簡易分光器（SGS）による
恒星と彗星の分光観測

自然研究専攻　自然システムコース

No.016758　越山　寛子

Ⅰ．目次

Ⅰ．目次

Ⅱ．はじめに
Ⅱ－１　この研究にあたって
Ⅱ－２　スペクトルとは
Ⅱ－３　分光器とは
Ⅱ－４　彗星とは
４．１　彗星とは
４．２　彗星の符号のつけ方
Ⅱ－５　マックホルツ彗星とは
５．１　マックホルツ彗星とは
５．２　マックホルツ彗星の軌道要素
５．３　マックホルツ彗星の見かけの動き

Ⅲ．観測装置
Ⅲ－１　観測装置一覧
Ⅲ－２　観測装置の詳細
２．１　かわべ天文公園 100 センチ反射望遠鏡
２．２　大阪教育大学 51 センチ反射望遠鏡
２．３　SGS 分光器
２．４　冷却 CCD カメラ　ST-7

Ⅳ．観測方法

Ⅴ．解析

Ⅵ．結果
Ⅵ－１　SGS 分光器の性能評価
Ⅵ－２　恒星のスペクトル
Ⅵ－３　彗星のスペクトル

Ⅶ. 考察
　Ⅶ－１　SGS の基本性能について
　Ⅶ－２　SGS を使って今後できること
　Ⅶ－３　恒星のスペクトルについて
　Ⅶ－４　彗星のスペクトルについて

Ⅷ. まとめ

Ⅸ. 参考文献

Ｘ．謝辞

ＸＩ．添付資料
　●IRAF による、解析方法（トレースから波長較正まで）
　●分光感度曲線用の、近似多項式一覧
　●π２ Ori の「RA Ordered List of Spectrophotometric Standards / ESO」のページ
　●SGS の使い方

Ⅱ．はじめに

Ⅱ－１　この研究にあたって

大学３回生の夏、アマチュア向けの分光器 SGS を使ってみようと思ったのがきっかけで、卒論でもやることに決めた。この分光器は、天文台や観測所にあるような天体の細かい組成などを決定するための高分散分光器とは違い、分散度が低く、観測から得られる情報が限られてしまう。

2004 年 8 月にアメリカ人のアマチュア天文家、マックホルツ氏によって C/2004 Q2 という彗星が発見された。予報では、4 等級前半まで明るくなり、しかも北半球では明るくなるとともに高度も上昇するという大変観測しやすい条件を持った彗星だった。以上の理由から、マックホルツ彗星（C/2004 Q2）を卒業研究の観測対象と決めた。

この彗星の地球再接近前後の計２度にわたって、和歌山県日高郡川辺町にあるかわべ天文公園の 100 センチ反射望遠鏡（三鷹光器）を用いて低分散分光観測を行った。大教大の望遠鏡に比べ口径が 2 倍であることから、集光力は 4 倍もの差が出る。

今回の観測では、マックホルツ彗星（C/2004 Q2）を二度にわたって撮影、分光して画像とスペクトルを取得した。1 回目は 2004 年 12 月 17 日の夜で、この時、太陽と彗星の距離は 1.345 天文単位（1 天文単位は約 1 億 5 千万 km）、地球と彗星の距離は 0.444 天文単位であった。また、2 回目の観測は 2004 年 12 月 17 日であった。この日は、彗星が地球に最も近づいた日で、太陽と彗星の距離は 1.235 天文単位、地球と彗星の距離は 0.347 天文単位であった。

この卒業研究では、それらの観測によるマックホルツ彗星（C/2004 Q2）の観測結果とともに分光器の性能評価も述べる。

この研究を機に、この分光器がより多くの機会に使われることを望む。

Ⅱ－２　スペクトルとは

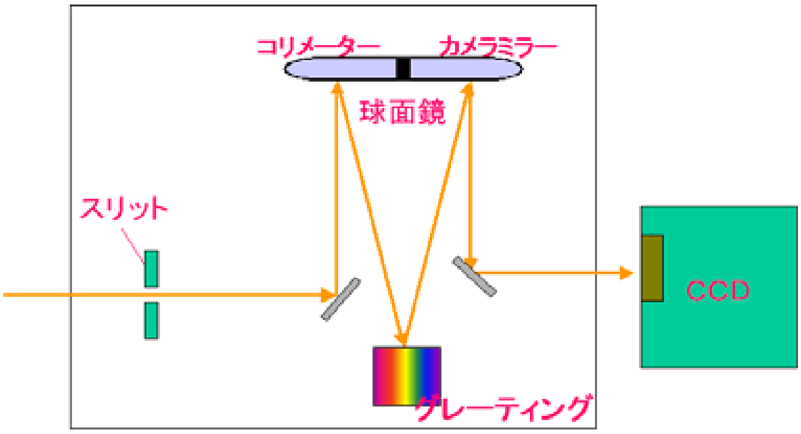
天体からやってきた光を、グレーティングやプリズムなどの分散系で分解し、波長ごとに並べたものをいう。中でも吸収線や輝線といった線スペクトルは、その天体の物理情報や天体を構成している物質を特定するのに非常に重要である。

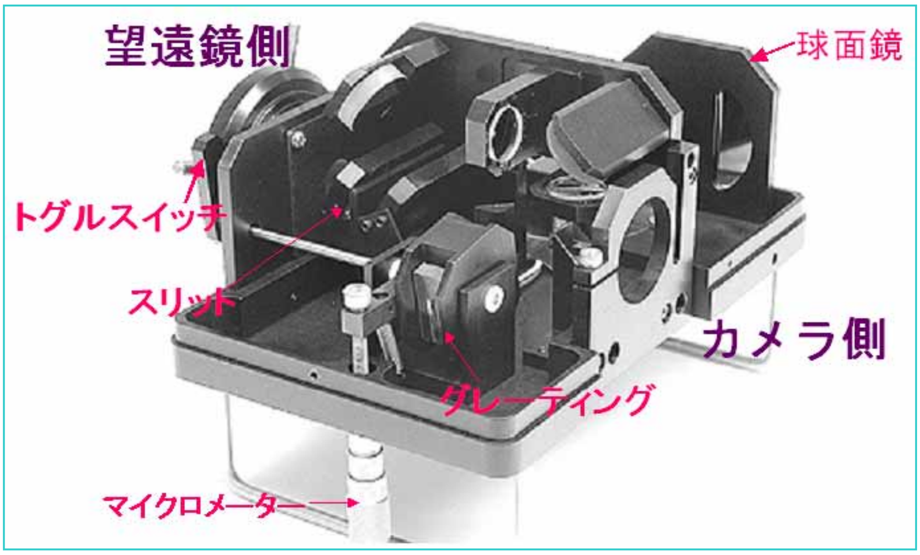
Ⅱ－３　分光器とは

分光器は光を波長別に分けて調べるための装置で、光を平行光にするコリメータ、波長別に進行方向を変える分散素子、光を検出器上に集めるカメラミラー（レンズ）から成る。

通常はスリットと呼ばれる小窓を通して、観測対象となる天体(またはその一部)の光だけを分光器に入れて観測する。今回使用した SGS はスリット式分光器である。

分光器は、スリットを通った光が、**コリメーター鏡**を通り平行光線になり、**分散系**（SGS はグレーティング）→**カメラ鏡**（カメラ上に分光像の焦点を結ぶ）→**光検出器**（ディテクター・今回はカメラ）の順で進み、スペクトルが検出できる。（下図）





Ⅱ－４　彗星とは

４．１彗星とは

一般に、彗星は汚れた雪玉と表現されることが多い。

彗星のもともとの姿は、エッジワース・カイパーベルトやオールトの雲の天体で、氷質の微惑星そのものか、微惑星が衝突合体した氷小天体であると考えられる。

これまでの観測から、彗星の本体は氷と塵（ダスト）のかたまりであることがわかっている。 彗星の本体を「核」といい、その成分の約 80%が水（氷）で、残りの 20%が二酸化炭素や一酸化炭素などである。それらに加えて、砂粒のようなダストが混ざっている。つまり雪の少ないときに作ったちょっと“汚れた雪だるま”そのものといってよい。ただし、その大きさは数 km から数十 km と、超特大サイズである。

汚れた雪だるま(撮影地：札幌)

これが何らかの原因で太陽から数ＡＵまで”落ちて”くると、太陽からの熱でその表面の氷が少しずつ融けていく。宇宙空間では融けても液体にならずに、蒸発（昇華）して気体となり、この気体に引きずられるようにダストも核から飛び出していく。 このようにして核から飛び出したガスやダストが、核のまわりに薄い大気を形成する。この大気を「コマ」と呼ぶ。「コマ」というのはラテン語で「髪の毛」という意味である。

彗星の重力はそれほど強くないので、大気はすぐに宇宙空間に流れ出す。宇宙空間には太陽からの電気を帯びた粒子の流れ（太陽風）があって、彗星から流れ出したガスやダストはこの太陽風に流されて、太陽と反対側に伸びていく。これが彗星の「尾」である。 尾には２種類あり、ガス（正確には電気を帯びた粒子すなわちイオン）の尾と、ダストの尾である。前者をイオンテイル（またはプラズマテイル）、後者をダストテイルという。

イラスト：西濱玲子（和歌山大学）

惑星形成論に従えば、エッジワース・カイパーベルト起源の彗星は基本的には惑星と同じ

黄道面近くを惑星と同じ向きに公転（順行）し、公転周期が比較的短いはずである。これに対し、オールトの雲起源の彗星は軌道面がばらばらで、順行するものも逆行するものもあり、公転周期が比較的長いはずである。

一般に、彗星の軌道は惑星重力の影響で変化するので、その起源によらず、二度と戻ってこなくなるものや長期彗星から短期彗星になったりその逆の現象が起きることもある。　どちらにせよ彗星は長い間太陽から遠く離れたところにあり、それができた原始太陽系星雲の姿（環境）を物語る物質科学的な情報を保存していると考えられ、彗星のガスの化学組成やダストの組成を調べれば、その彗星の故郷の環境、もっといえば太陽系初期の状態に近い環境の組成が得られると考えられる。

４．２　彗星の符号のつけ方（以前に観測された記録が無い彗星）

彗星の記号は年、月、発見順を元にして付けられる。

マックホルツ彗星 C/2004 Q2 を例にとって示す。

最初の「C」は「Comet」を意味し、発見直後の全ての彗星にはこの符号が付けられる。発見後の観測により軌道が楕円軌道であると分かり、その周期が 200 年未満の場合は「P」（Periodic）という符号が付けられる。放物線軌道の場合や、周期が 200 年以上の楕円軌道の場合は「C」のままである。また、消滅したり、長期間回帰が観測されない彗星には「D」、彗星と思われていた彗星が小惑星だと分かった場合は「A」、軌道を求めることができなかった彗星には「X」を付ける。現在までに「A」と「X」が付いた天体は無い。

「2004」は、「2004 年」を表し、発見された年が入る。

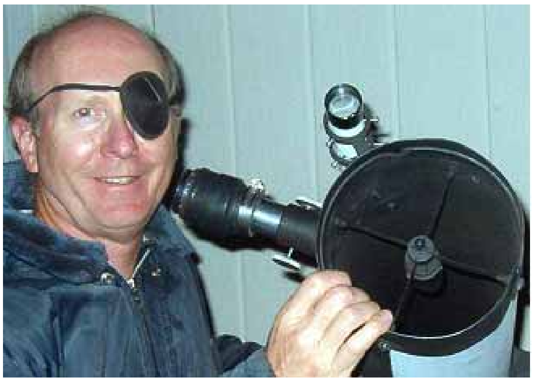
「Q」は発見された時期を表す。1 月上旬が「A」、1 月下旬が「B」･･･というように、1 年を 24 に分けて表す。但し「I」は数字の「1」や、アルファベットの「J」と紛らわしいので使われない。そのため「Q」は 8 月下旬を表す事になり、12 月下旬は「Y」となる。

「２」は、その彗星が発見された時期内での発見順を表す。

Ⅱ－５　マックホルツ彗星とは

５．１　マックホルツ彗星とは

２００４年８月２７日、アメリカ・カリフォルニア州のアマチュア天文家 ドナルド・マックホルツ氏（Donald Edward Machholz）は、１９６８年のクリスマスに２００ドルで買ったという口径１５ｃｍ３５倍の反射望遠鏡を エリダヌス座方向に向け、11.2 等という、かすかな彗星を発見した。１９７８年から１９９４年に９個の彗星を発見したマックホルツ氏にとって、これが１０個目の発見であった。



（写真：発見者のマックホルツ氏）

これが、**C/2004 Q2（Machholz）**、今回観測したマックホルツ彗星である。

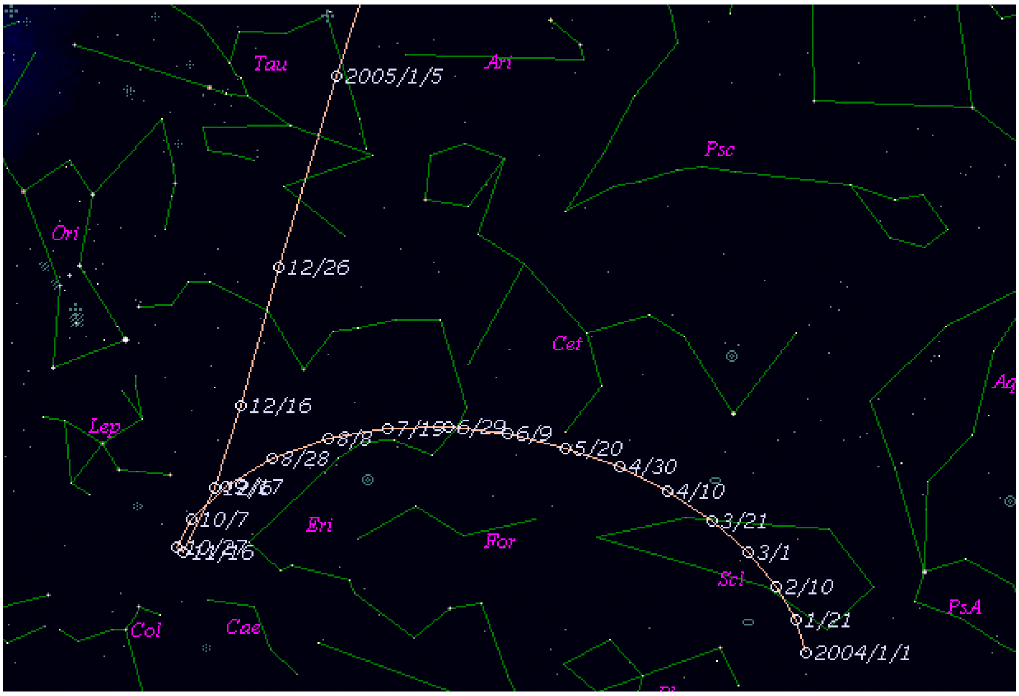
周期は約 10 万年と推定されており、長周期彗星と考えられている。
長周期彗星とは、周期が 200 年以上のものをさす。

最接近時のマックホルツ彗星
撮影：
太井義真(西はりま天文台)
FinePixS2Pro
＋　300mm(F2.8→4.0)
露光時間:180s (2005/1/9)

５．２　マックホルツ彗星の軌道要素

近日点通過時刻（TT）	2005 年 1 月 24.1301 日
近日点距離（q）	1.182769AU
離心率（e）	1.0
近日点引数（ω）	20.8256 度
昇交点黄経（Ω）	92.9471 度
軌道傾斜角（i）	38.6780 度

５．３　マックホルツ彗星の見かけの動き（天空上での動き）



（ステラナビゲーターにて作成）

Ⅲ　観測装置

Ⅲ－１　観測装置一覧

●かわべ天文公園（和歌山県日高郡川辺町和佐 2107-1）

- 100 センチ反射望遠鏡（三鷹光器）
- SGS 分光器（SBIG）
- 比較光源用電源装置（内田洋行）および Hg ランプ

● 大阪教育大学 柏原キャンパス（大阪府柏原市旭ヶ丘 4-698-1）

- 51 センチ反射望遠鏡（三鷹光器）
- SGS 分光器（SBIG）
- 比較光源用電源装置（内田洋行）および Hg ランプ、Na ランプ、Cd ランプ

Ⅲ－２　観測装置の詳細

２．１　かわべ天文公園 100 センチ反射望遠鏡

製作	三鷹光器（株）
光学系	カセグレン焦点
主鏡有効口径	1000mm（100cm）
合成口径比	F／10
焦点距離	10000mm（10m）
設置座標	北緯 33°53′27″.2973、東経 135°13′11″.7725

２．２　大阪教育大学 51 センチ反射望遠鏡

制作	三鷹光器（株）
光学系	カセグレン焦点
主鏡有効口径	510mm（51cm）
合成口径比	Ｆ／１２
合成焦点距離	6000mm（6m）
設置座標	北緯 34°32′52″.716、東経 135°39′6″.646

２．３　SGS 分光器

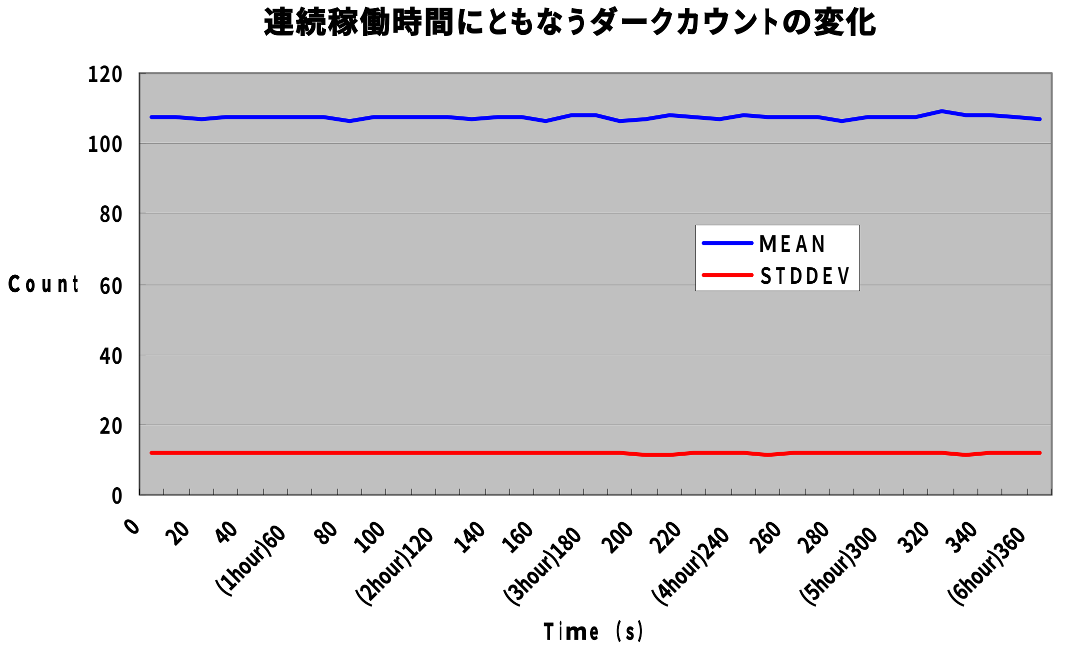
製作	SBIG 社
ブレーズ波長	５０００Å
グレーティング	低分散　：１８０本/mm、４．３Å/pixel 高分散　：６００本/mm、１．０Å/pixel
スリット	ナロースリット　：　１８μm ワイドスリット　：　７２μm
中心波長選択方法	マイクロメーター
対応波長域	3800～7500Å
対応 F 値	F/6～F/10
分解能	2.2(高分散)Å or 8(低分散)Å
分散能	1.07(高分散)Å or 4.3(低分散)Å　/pixel

２．４　冷却 CCD カメラ　ＳＴ－７

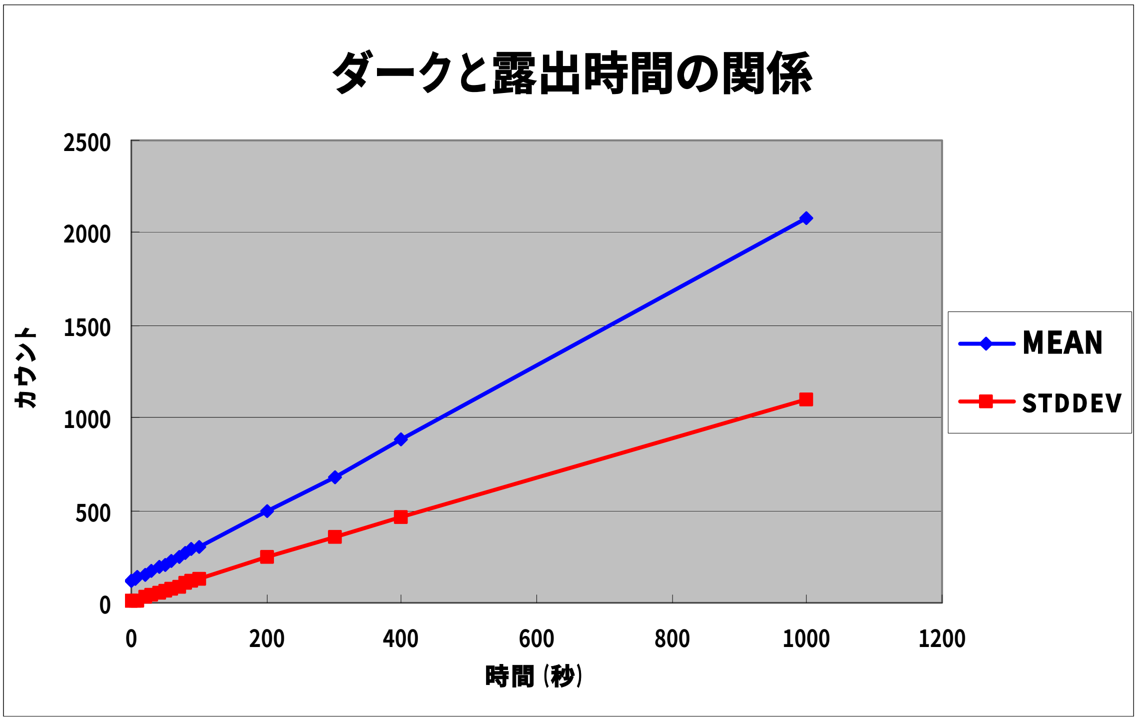
製作	SBIG 社
CCD チップ	KAF400/401 、765 画素×510 画素 ９μm角/1 画素
ガイドチップ	TI 社製 TC211 、192 画素×165 画素 13.75×16μm/1 画素
読み取りノイズ	15e-RMS
冷却装置	ペルチェ１段冷却空冷仕様　温度設定可
暗電流（ダークノイズ）	0℃にて、１画素あたり約 1e-
電子容器容量	100,000e-
A/D 変換器分解能	16bit
電源電圧・消費電力	DC 12V 2.5A（アンペア）
COM ポート	PC/AT 準拠パラレルインターフェイス(D-sub 25pin)
シャッター	機械式（特殊合金製薄型スリットタイプ） 速度=0.11～3600 秒
CCD 本体重量	約 800g（ケーブル別） 幅 130mm×高さ 130mm×厚み 70mm
CCD 制御ソフト	CCDOPS（標準付属ソフト）

ST-7 のダークの性質

8 月 24 日　CCDTEMP：＋0.19℃　TEMP:＋30.0℃



8 月 25 日　CCDTEMP：－0.65℃　TEMP:＋27.0℃
＜10 分間隔で 6 時間、10秒露出によるダークカウントの比較＞



Ⅳ　観測方法

かわべ天文公園における観測は 11／16、12／16〜17、1／5〜6 の３回にわたって観測、うち彗星のスペクトルは 12 月以降の２回の観測で取得した。（計４夜）

望遠鏡に、（望遠鏡側から順に）ＳＧＳ分光器、ＳＴ－７を装着し、ノートパソコン上で走らせた CCDOPS によってカメラを制御した。

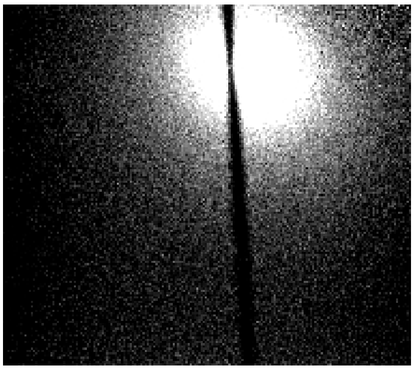
天体の分光撮像のあと、メモリを動かさずに比較光源を撮像した。

また、必要に応じて、メモリを動かし異なる波長域で撮像を行った。

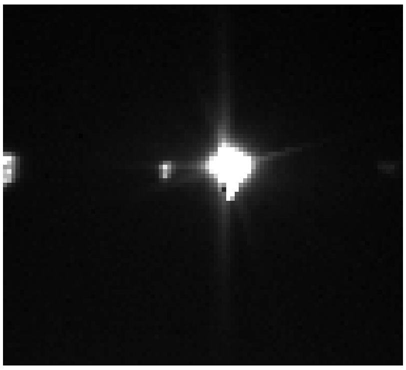
最後にダーク画像およびフラット画像を撮像した。

かわべ天文公園の１m望遠鏡に SGS を取り付けた様子。

彗星がスリットに落ちた様子



恒星がスリットに落ちた様子



恒星よりも彗星（のコマ）のほうが、恒星よりもずいぶんと大きいのがわかる。

望遠鏡と SGS の取り付けについて

●分光器と望遠鏡（バヨネット)の接続部分に、
ボーグ社のカメラ用マウントを３つ使用。
→BORG7502,7901,7000 (SGS 側から順に）

大阪教育大学とかわべ天文公園の望遠鏡はともに三鷹製であるため、バヨネットが共通であった。それゆえに、このアダプターのみで両方の観測が行えた。
これによる光路延長は、25mm であった。
分光器と望遠鏡の取り付け部分にはがたつき等は見られず、安定していた。

V　解析

NOAO（National Optical Astronomy Observatories）で開発された天文用の画像データ解析ソフト、IRAF（Image Reduction and Analysis Facility）を使用し、imcombine、imarith のタスクを使用してダークをひき、フラットで割った。

twodspec→apextract→apall のタスクを使って天体スペクトルデータの一番カウントの高い部分をトレースし、比較光源も同じ部分をトレースした。onedspec→identify のタスクで比較光源に波長を決めた後、refspec のタスクで天体スペクトルと比較光源の関連付けを指定、dispcor のタスクで天体の波長較正を行った。

詳しい作業方法は最後に添付する。

VI　結果

① SGS 分光器の性能評価

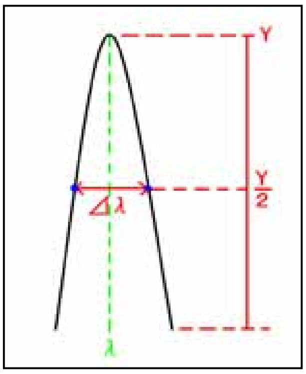
実験（観測）により求まった波長分解能の一覧を示す。

観測する光の波長(λ)の、光の強度の違いを識別できる最小の波長幅(Δλ)に対する比を波長分解能(R)という。波長分解能は、以下の式で求まる。

$$R = \lambda / \Delta\lambda$$

Δλ は、IRAF を用いて半値幅を求めた。測定用のイメージには、Hg (水銀ランプ) の輝線を用い、その平均値を求めた。

半値幅は、Y/2 の位置におけるΔλである。(左図)



図）半値幅Δλ

	低分散	高分散
ナロースリット	550	1489
ワイドスリット	120	590

表）SGS 分光器の測定波長分解能（R）

また、実験（観測）により実際に求まった、１フレーム（1 回の撮像）での観測可能波長域を以下に示す。

低分散	3309.65
高分散	813.31

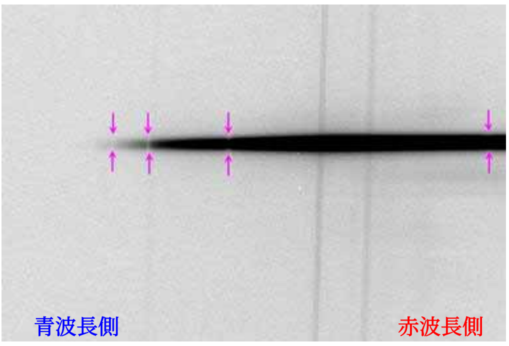
表）１フレームに写る波長域

② 恒星のスペクトル

彗星の撮像の前に、望遠鏡との組み合わせでどの程度のデータが取れるのかという目安を知るためにも恒星スペクトルを撮像した。

スペクトルは以下のように二次元の fits イメージで得られる。

右図）画像の上から下まで貫通しているのは、スカイ（大気光）である。
ピンクの矢印の部分に、吸収線が見えているのがわかる。
画像は見やすいように反転している。



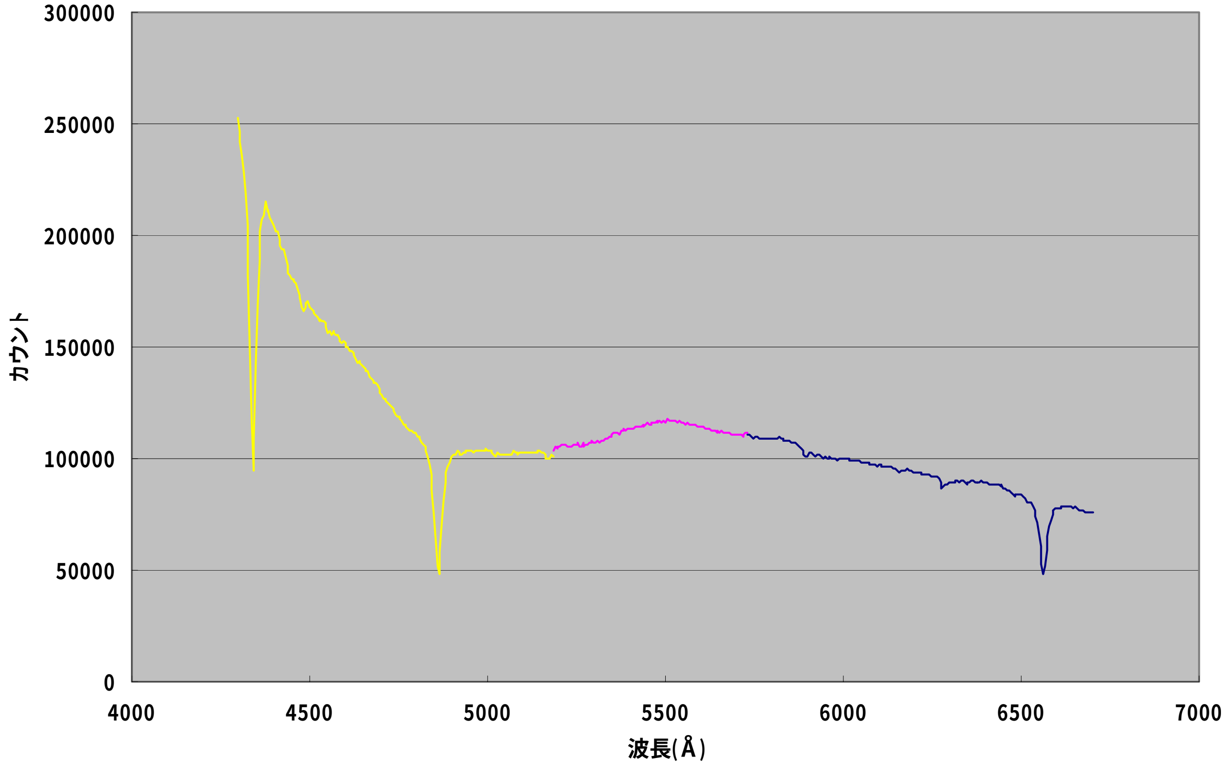
これが 1 次元化および波長較正の処理をへると、下のようになる。

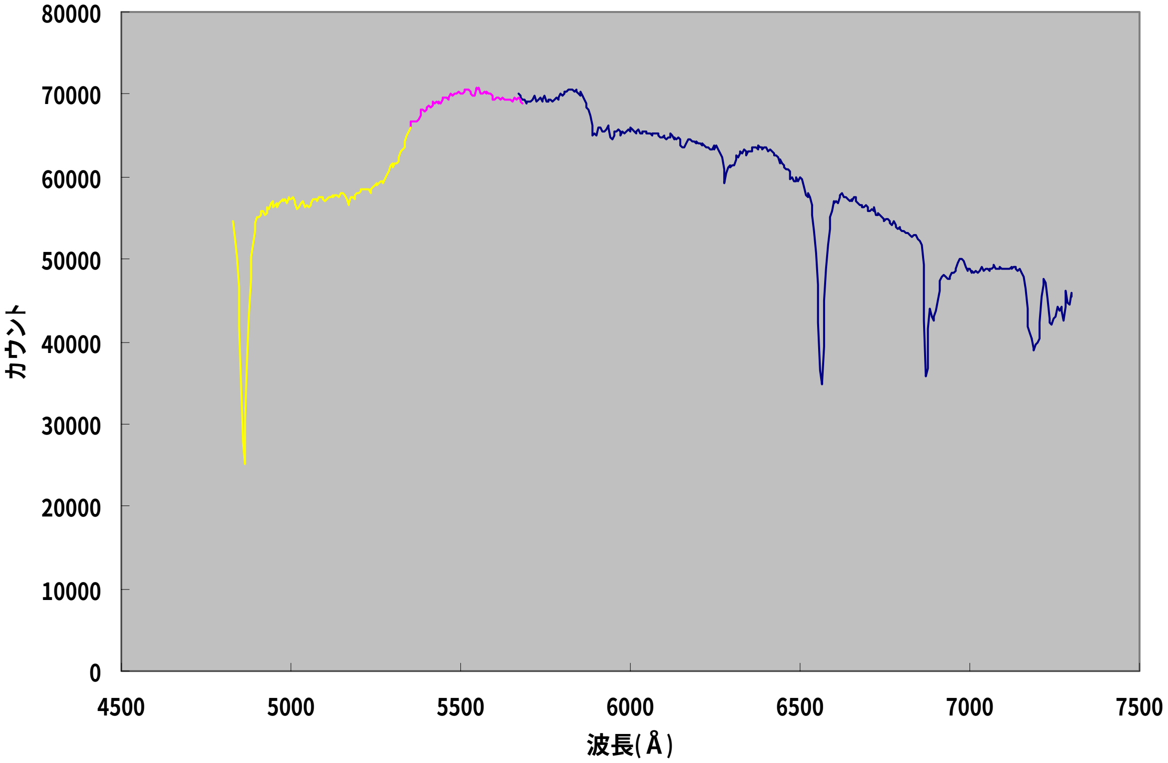
解析には、この状態になったイメージを使う。

撮像した恒星の一覧を以下に示す。

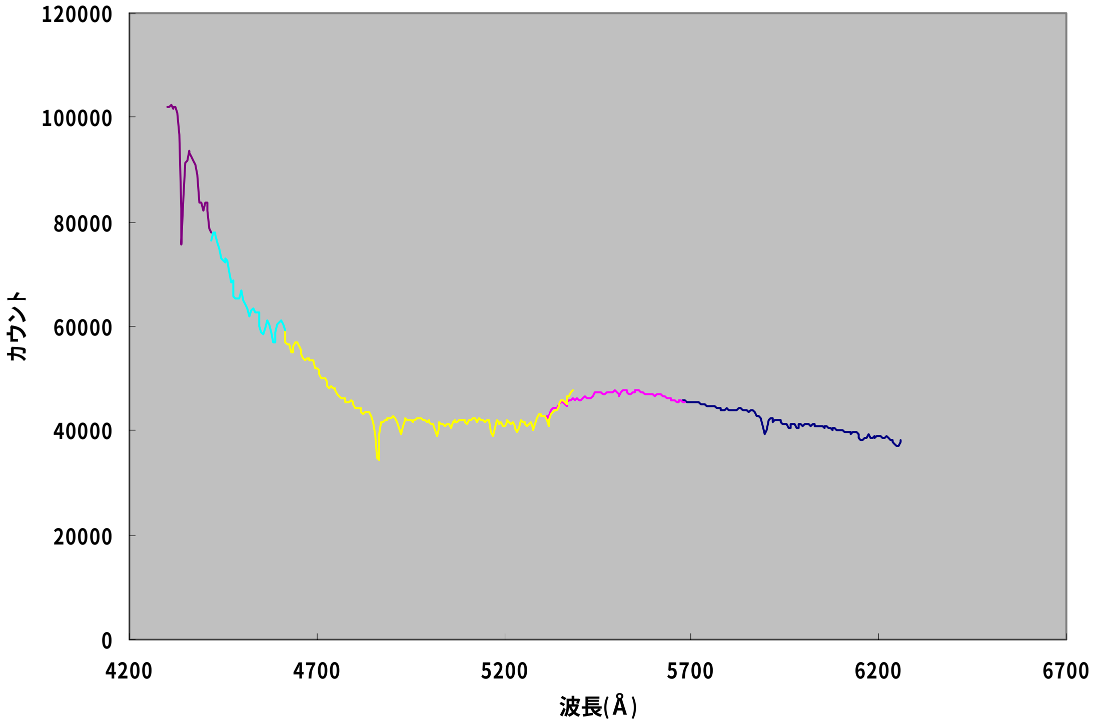
恒星名	実視等級	スペクトル型
α Lyr (Vega)	0.03	A0 V
α Cyg (Deneb)	1.33	A7 V
α Aql (Altair)	0.93	A7V
分光標準星 HR1544	4.36	A1Vn

一次元化したスペクトル（縦軸：相対強度　横軸：波長λ（Å））
☆ベガ（感度補正済み）　縦軸：強度　　横軸：波長

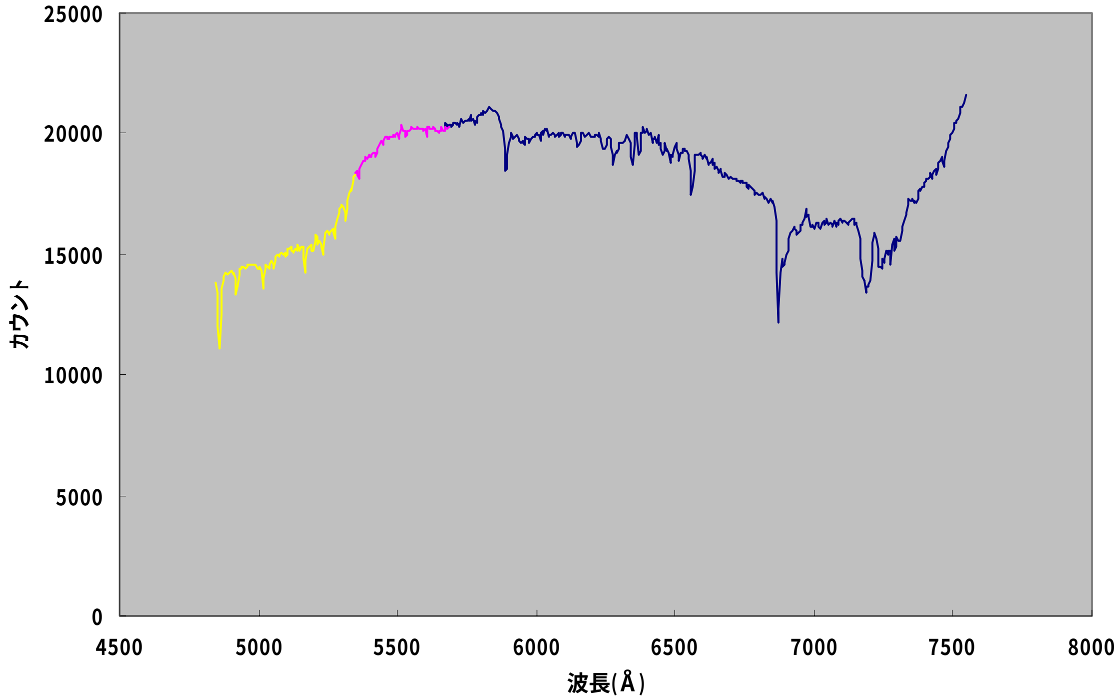




☆デネブ（感度補正済み）

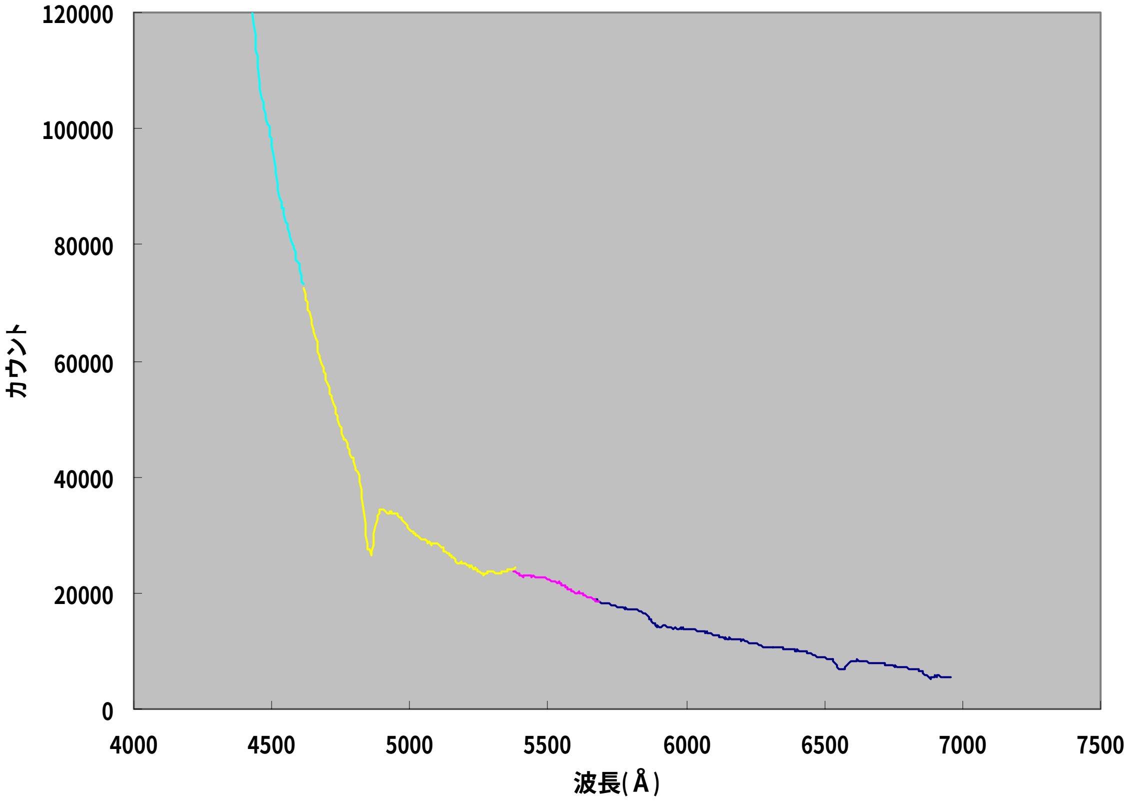


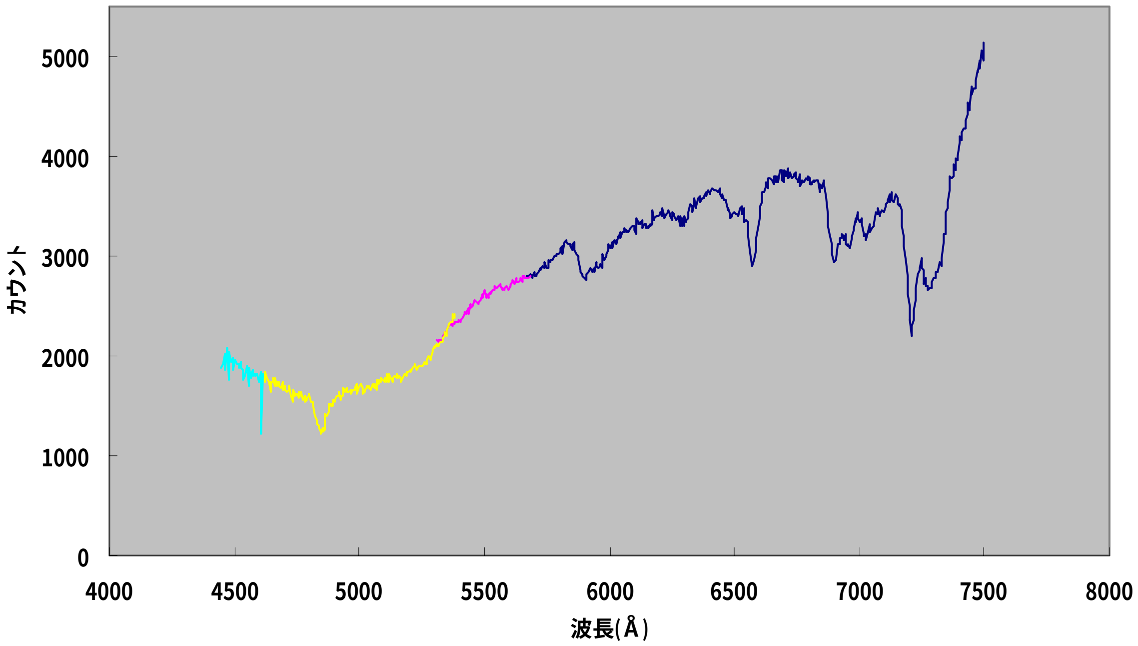
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
カウント
4200
4700
5200
5700
6200
6700
波長(Å)



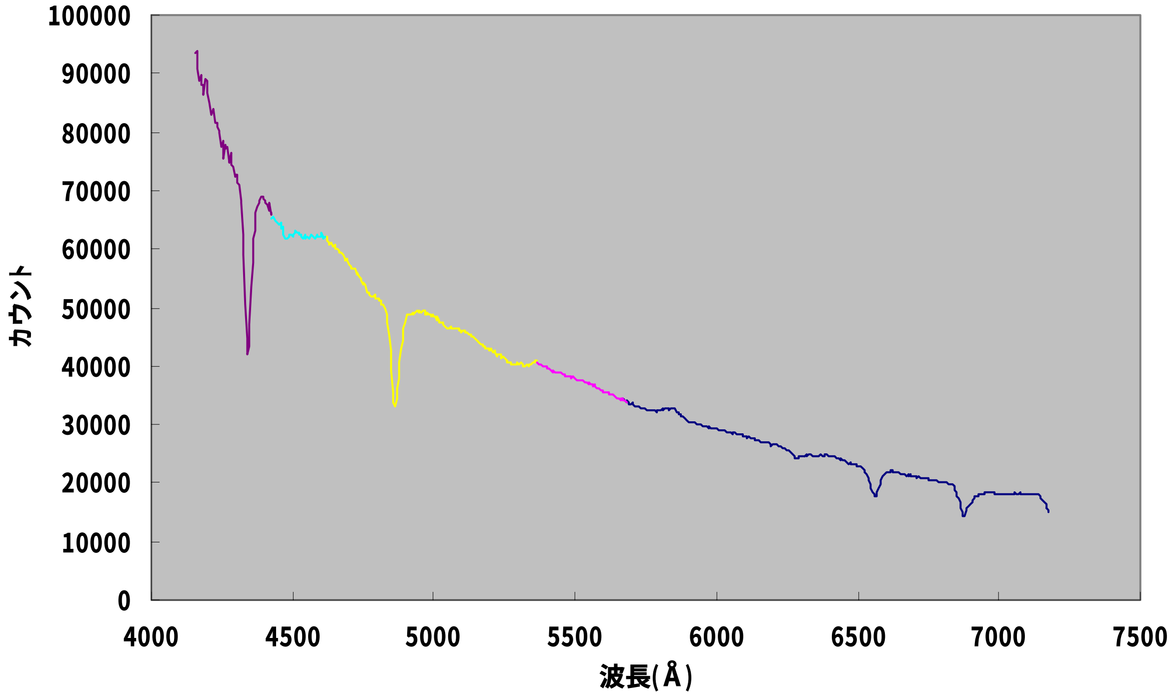
25000
20000
15000
10000
5000
0
カウント
4500
5000
5500
6000
6500
7000
7500
8000
波長(Å)

☆　　アルタイル（感度補正済み）



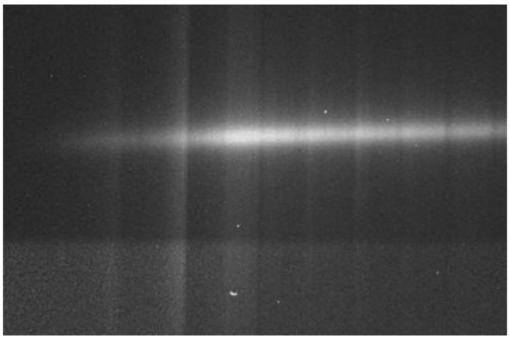


☆HR1544（感度補正済み）



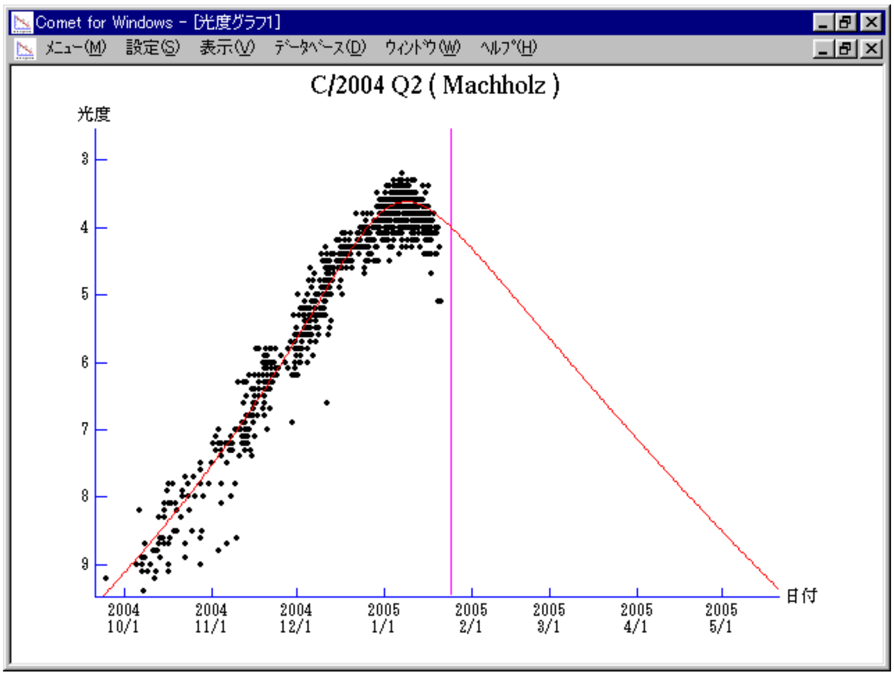
③彗星のスペクトル

恒星と同じように、まずは２次元の fits イメージで得られる。恒星とは違い、輝線がたくさん見えているのがわかる。



左図）彗星スペクトルの生データ。
青いほうにたくさんの輝線が見えているのがわかる。これが彗星スペクトルの特徴である。

彗星のスペクトルは 2 度の期間にわたって取得したが、そのうち 2 度目は地球再接近の頃であり、光度が最も大きくなった時期である。



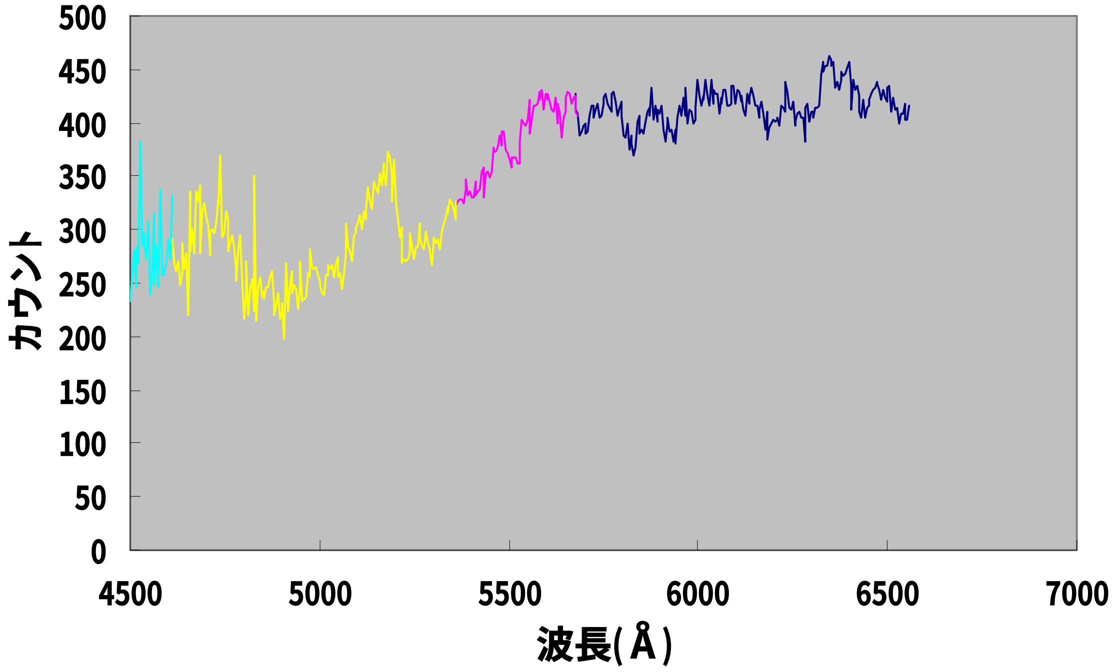
図）マックホルツ彗星 C/2004 Q2 の光度変化（提供：吉田誠一氏）

以下に、観測期間と彗星の地心距離(Δ)および日心距離(r)、実視等級をのせる。

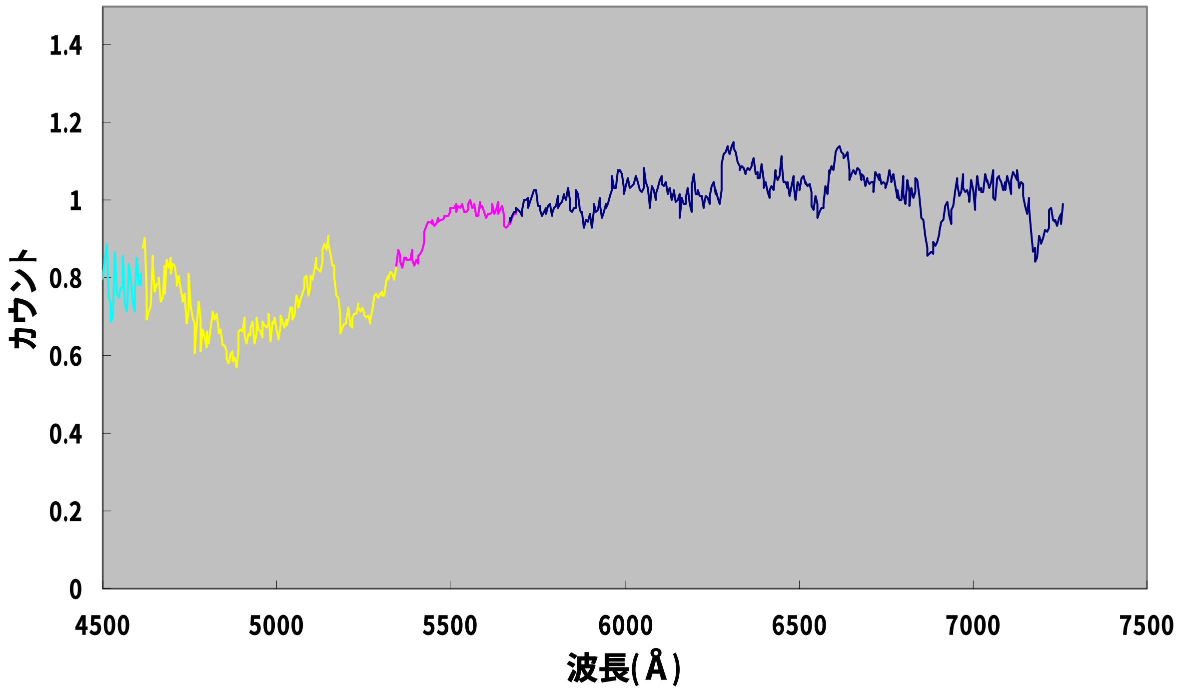
	地心距離（Δ）	日心距離（r）	実施等級（m）
12 月 17 日	0.444AU	1.345AU	5.0
1 月　5 日	0.347AU	1.235AU	3.5

一次元化した彗星のスペクトル

１２月１７日のマックホルツ彗星（感度補正済み）



１月６日のマックホルツ彗星（感度補正済み）



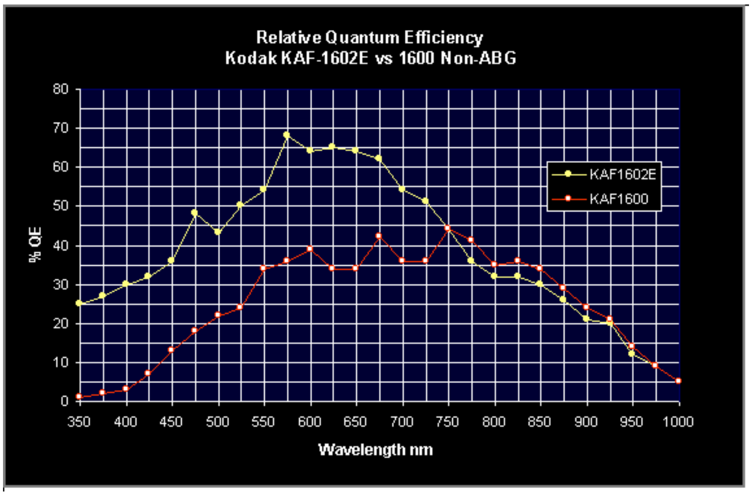
Ⅶ　考察

Ⅶ－１　SGS の基本性能について

１．１　取扱説明書に書かれている基本性能は、ST-７Eという新しいカメラを使った場合のスペックであり、波長分解能等には大きな違いは現れないが、観測可能波長域に大きな違いが現れることがわかった。

その大きな例として、彗星スペクトルにおいて、CNの顕著な輝線が現れるはずの 3800Å前後にはまったくカウントがなく、輝線らしきものの姿が見えないためである。

SBIGが発表している波長別効率曲線を見ても、青波長側にほとんど感度がないことがわかる。



図）KAF1600/1602Eの波長別効率曲線

※本学のST-7 はKAF1600（赤）

１．２　中心波長選択方式がマイクロメーターであるため、少しの刺激でもメモリが動いてしまう可能性があるため、観測中は細心の注意が必要である。しかし、姿勢を変えた程度で動くようなものではないので、心配はない。

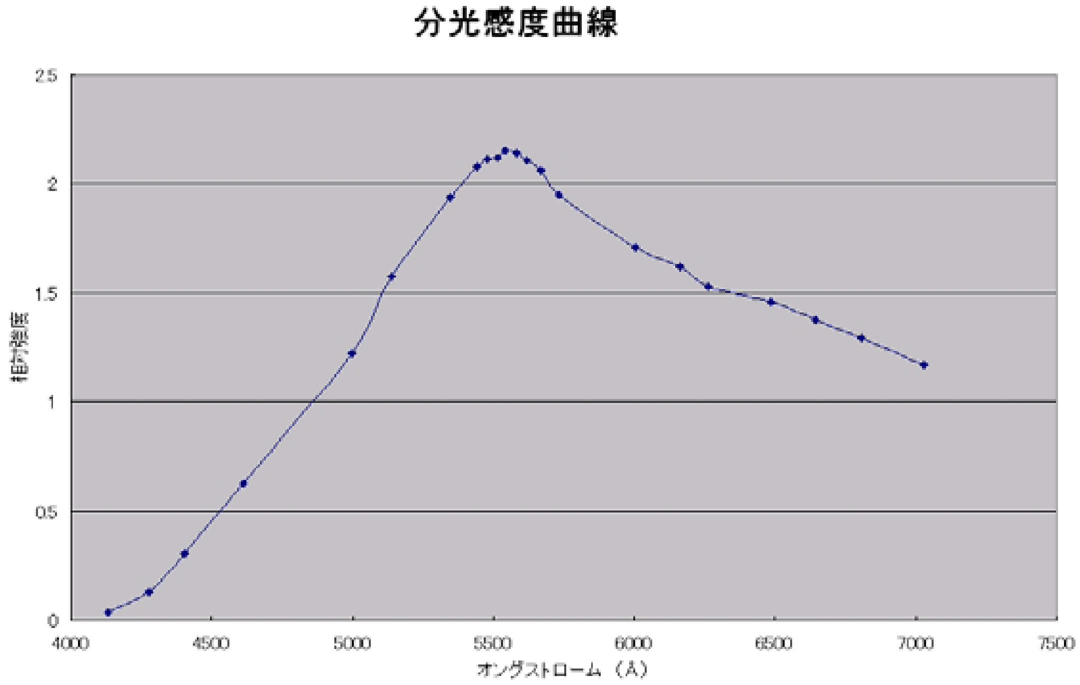
１．３　カメラの取り付け時には、SGS の取り付け板の向きとぴったりあわせると、輝線が傾いてしまうという問題があるため、比較光源などをフォーカスモードでチェックしながら、カメラの装着を行うことが望ましい。

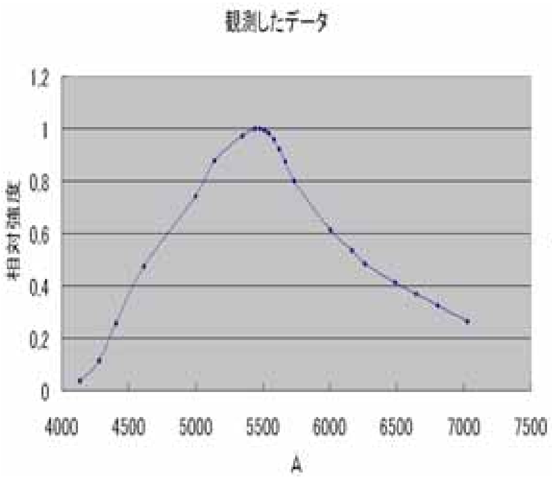
１．４　ダーク撮像の際、真っ暗にして行わないと、光漏れが起こるようである。

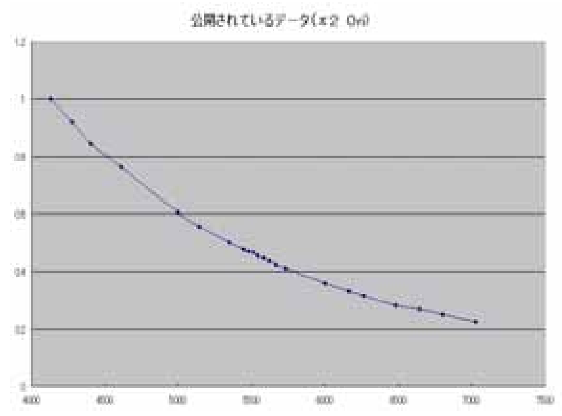
光漏れに関しては、太陽のスペクトルを撮る際にも同じことが起こった。はじめは光学系（分光器）による迷光や光漏れの可能性を疑ったが、カメラのほうの問題であると考えられる。ダークは一切の光学系を通さずに撮像しているのに光漏れが起こるということから、カメラに問題があると考えるのが妥当である。

１．５　波長分解能に関しては、取扱説明書の理想値に近い値が出た。
しかし、ピントがねじ 2 本で止めた球面鏡にて調整しているだけなので、こちらは姿勢が変わったりすると少しずれることもある。
ピントがずれれば、必然的に波長分解能が小さくなることも考えられる。

１．６　分光標準星リストから HR1544(π2 Ori）を選び、観測した。その観測データを公表されていたデータ（RA Ordered List of Spectrophotometric Standards / ESO）で割り、分光感度曲線を求めてみた。
結果は、以下のようになった。
実際の天体の較正には、これを用いた近似曲線（多項式）を求めてそれを用いた。







１．７　ST-7 のダークについて、次のようなことがいえる。

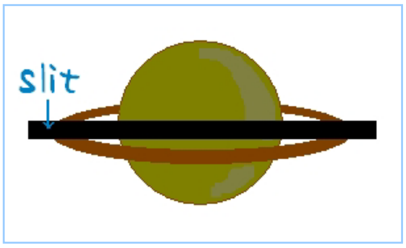
ST-7 のダークは、連続稼働時間とダークカウントの関係において、ほとんど変化が見られないことから、温度さえ一定であれば、いつ撮影しても変わらないということが言える。（観測の最後にまとめての撮影でもよい）

また、露出時間とカウントは比例関係にあることもわかった。

Ⅶ－２．SGS を使って今後できること

- ５０ｃｍを使っての限界等級は、恒星ならば６等前後までである（空の条件などにもよる）。しかし、銀河や彗星などの広がった天体になると恒星よりも光が弱くなってしまうため、10 等までは無理だと思われる。
  しかしながら、公共天文台ならマシンタイムの問題があるが、本学なら５０ｃｍ望遠鏡のマシンタイムがほぼ無限であるといってよい。今回のような肉眼クラスの彗星であれば、アマチュアが継続観測をすることに意義があるといわれるが、もし本学で高分散分光観測を継続して行うことができれば、アマチュアよりも大きな口径による継続観測となり、より多くの情報を得ることができるかもしれない。その意味で、大変意義があると考えられる。

- 土星のスペクトルについて、土星の輪の回転が差動回転をしていることは有名である。そこで、土星のスペクトルを撮像したらどうなるかについて考えてみる。
  その際、スリットは土星に対して右図のように当てなくてはならない。



  まず、土星の輪の回転が秒速 9～24ｋｍ／s（速度差は最大でも１５km／s）であることと、波長分解能が最高でもＲ＝1489 であることに注目しなくてはならない。赤方偏移を求める式は
  $z = \Delta\lambda / \lambda = v / c$　（ｖ：視線速度（後退速度）、ｃ：光速度）
  であらわされる。また、前にも述べたように波長分解能は　$R = \lambda / \Delta\lambda$　であるから、$R = 1 / z$　と書き換えられる。つまり、$R = c / v$ である。
  あてはめて計算すると、R=20000～となる。
  これはつまり、波長分解能 R＝20000 以上を持つ分光器でないと確実に検出できないということを示している。
  写真に写る A・B 環になると、もっと速度が小さいため、波長分解能も高くなくてはならない。実際に計算してみると、A リングと B リングの速度差は、最大で

も 3.659m/ｓしかない。この場合、波長分解能は 5 倍の R=82000 以上の分光器を用いないと検出することができない。
しかも、これは完全な edge‐on の場合の数値である。通常土星の輪は傾いており、視線速度も傾きが大きいほど減少する。
したがって、この SGS では、高分散を用いても、土星の輪におけるドップラーシフトを検出することはできない。

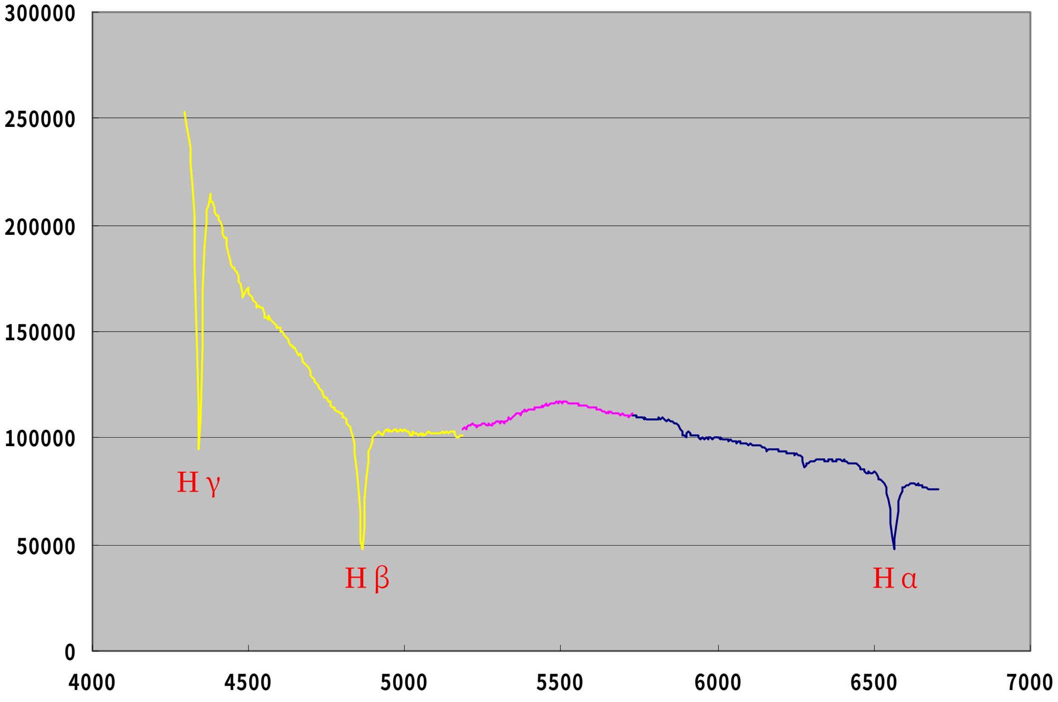
逆に、この分光器で検出できる視線速度はどのくらいなのだろうか。
もっとも波長分解能の高くなる高分散＋ナロースリットで、1489 である。
これを当てはめて計算すると、200km／s になる。つまり、200km／s 以上で運動するものは、ドップラーシフトとして検出できることがわかる。
これに当てはまる速度を持つものといえば、銀河の公転速度が約 225km／s と 200km／s を満たしている。そのため、銀河円盤の回転によるドップラーシフトは検出できると考えられる。

・ 教育利用として、学生実験レベルでの使用が可能だと思われる。
扱いが簡単なので、学生自身が実際に恒星のスペクトルを撮ってみることで、理解度が深まると思われる。

Ⅶ－３．恒星のスペクトルについて

今回撮像した夏の大三角形（ベガ、アルタイル、デネブ）の３つの恒星について、以下のようなことがわかる。

①．　恒星のバルマー線が検出された。（ここではベガを例に示す）



②．同じＡ型星に見られるバルマー線（吸収線）でも、強さが全然違うことがわかった。

③．青いほうのバルマー線（Hβ や Hγ）がはっきり見えているベガは、他の２天体より表面温度が高いのではないかと推測できる。

④．分光感度曲線の近似曲線を求めて、すべての恒星について割り算を行い、感度補正を試みた。（観測データ／感度曲線の近似）
その際、近似曲線はある幅の波長領域を５つに分け、分割して求めた。
近似曲線の多項式と、それを用いた波長域を最後に添付して示す。また、グラフ中で式ごとにグラフ線の色を変えたので、それも一緒に示す。
もともと、分光感度曲線を求める際に、4100～7250Åまでしか値を拾っていなかったために、それよりも短波長・長波長側のデータは信用できない。
感度補正の結果、4000Å台はもともとあまりカウントを稼げていなかったために、ノイズか線スペクトルかの判別が難しく、信用できるデータとはいえない。しかし、十分にカウントのあった 5000Åよりも長波長域は、十分に信用

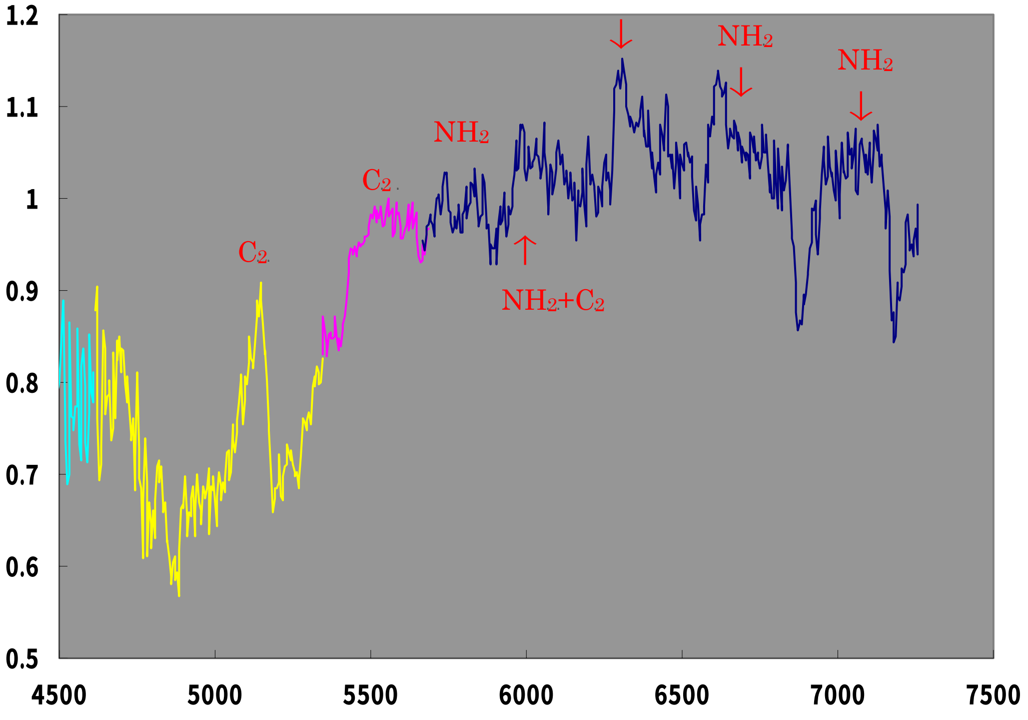
できるデータといえる。
しかしながら、5000Å付近のスペクトルが盛り上がっているデータが多いことに注目したい。
ベガ・アルタイル・デネブはA型星であるから、本来ならばhr1544（分光標準星）のように左肩上がりの短波長側が強いスペクトルでなくてはならない。
なぜ、このような形になったのか、次の項で考察してみることにする。

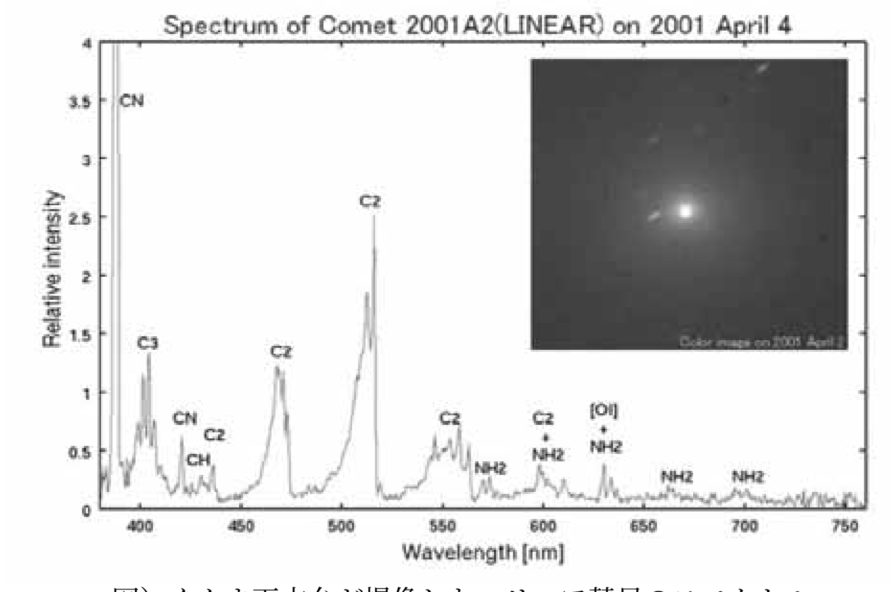
⑤. 分光標準星hr1544を撮像した際、この天体は高度が48.91°もしくはそれより低い状態であった。この天体から得たスペクトルを用いているために、補正値に誤差が出ていると考えられる。
また、本来分光標準星とはオブジェクトと同じ日に空の状況が変わらないうちに撮像すべきものであった。しかし、今回はすべてのデータについてある一夜に撮った同じスペクトルを用いた感度曲線を使用しているために、オブジェクトの高度や空の状況（雲の有無など）により変動していると考えられる。
大きな例がアルタイルで、この日は曇り時々晴れという天候であったため、分光標準星の撮像時とは著しく条件が異なった結果、信頼度の低いスペクトルになってしまったと考えられる。また、分光標準星の観測を同じ望遠鏡で行っていないことも大きな要因と考えられる。

Ⅶ－４．マックホルツ彗星のスペクトルについて

① 彗星のスペクトルが一見して他の恒星と違い、ぎざぎざとしているのがわかる。また、他の恒星とは違い、吸収線よりも輝線が卓越しているのがわかる。彗星のスペクトルで、ぎざぎざに見えているのは彗星コマのガス成分である。コマの典型的な成分である C_2があるのがわかる。（C_3やCNは、前出の理由により検出できなかった）

分光感度曲線による感度補正と、月のスペクトルによる太陽光成分の補正をかけたグラフについて考察する。





図）ぐんま天文台が撮像した、リニア彗星のスペクトル

上のデータは、１月６日の地球最接近時のマックホルツ彗星のスペクトルを、月のスペクトルと分光感度曲線で補正したものである。
このグラフを、下にあるぐんま天文台の撮影したリニア彗星 C/2001 A2 と比較すると、C2(Δν＝＋１)のバンドが見づらくなった(ノイズと判別がつかなくなった)ものの、赤波長側に見える NH2 分子のバンドがよく見えるようになった。（強く現れている）
ぐんま天文台のスペクトルと比べて NH2 が強くなった理由としては、CCD カメラの感度補正がうまくいっていないことが原因として考えられる。
構成分子はリニア彗星とほとんど同じであることから、マックホルツ彗星はほかの彗星と同じような物質でできており、ごく普通の彗星であるということができる。

② 彗星のコマ中の分子からは、X 線から紫外線、可視光、赤外光、電波にいたるまで、実にさまざまな電磁波が放射されている。
今回観測した可視・赤外線の波長（波長 4000Åから 50000Å程度まで）では、分子が太陽の放射を受けて、蛍光（fluorescence）機構によって発光している。これは、分子が太陽からのフォトンを受けてエネルギー的に高い状態に一時的に励起され、ある時間の後に再び元の低いエネルギー状態に戻る際に、状態間に相当するエネルギーをフォトン（光子）の形で放出する現象である（したがって、分子が最初に吸収した光の波長と、ほぼ同じ波長の光を放出する）。

③ 普通C_2分子は通常は電子的に低い（安定な）状態にある。その分子が特定の波長のフォトンを受け取ると、よりエネルギーの大きな、不安定な状態へと遷移（励起）する。このエネルギーの大きな状態は不安定であり、ある時間の後には、自然と下の状態に落ちてしまう。このとき、上の状態と下の状態（基底状態）の間のエネルギーに相当する光を放出する。
分子のエネルギーは、分子の持つ電子の運動状態によって大きく変わるが（エネルギー的には可視光の波長程度）、分子を構成する二つの炭素原子間の振動運動の状態によって、若干のエネルギーを持っている（エネルギー的には赤外線の波長程度）。したがって、先に述べて二つの電子的なエネルギー状態の中で、それぞれ、異なった振動エネルギーを持つことができる。
Δν（上の状態と下の状態でのνの差）が 0 の場合、波長が 516nmから短波長側に集中して発光が見られる。同様にしてΔν＝±１の場合にも、波長 560nm、470nm付近に集中して光を発する。こうして特定の波長近辺に集中した輝線群を「バンド（帯)」と呼ぶ。C2 の場合、波長 500nm付近に見られるいくつかのバンド（Δν＝0、±1、±2、・・・）は、Swan（スワン）バンド系列と呼ばれている。
バンドは、それぞれ異なる波長の遷移の集合であるので、高分散分光器を使ってよ

り細かく光を波長に分けると、個々の波長における輝線に分解される。

④ 彗星のスペクトルは、通常月や太陽類似星のスペクトルで割ると、平ら（一直線）になる。しかし、今回、月のスペクトルを用いて割り算をした結果、直線にはならず、赤波長側の強度が大きくなった。
このような結果になった理由として、彗星と月を撮った高度や空の条件が異なること、彗星と分光標準星を撮った高度や空の条件が異なることなどが理由として考えられる。

⑤ もし、スペクトルが輝線成分だけになれば、H_20 卓越のコマか否か、もしくはガスリッチかダストリッチかという判別もできたであろう。今後の課題である。
(輝線成分だけになれば、輝線の正しい相対強度が求まるため、正しい比が求まる)

⑥ 彗星を写真に撮ると青っぽく写るのだが、それは、今回検出できなかった有毒なシアン（CN）や、CO が太陽の光を受け、光っているためである。

Ⅷ. まとめ

- 分光器の性能評価を行った結果、取扱説明書通りにはならず、カメラの経年劣化などの問題も考えられる。

- 恒星のスペクトルを撮像した結果、低分散モードではバルマー線と大気吸収くらいしか拾うことができないが、同じ A 型星でもバルマー線の強さなどに違いがあることがわかった。

- マックホルツ彗星のスペクトルから、この彗星は C2（スワンバンド）、NH2、[O I]といった分子輝線バンドを持っていることがわかり、他の彗星と同じような分子で構成されている、ごく普通の彗星であることがわかった。

- 分光感度曲線は観測天体と同じ高度、同じ空の条件、また同じ望遠鏡で観測する必要があったことから、今回のデータによる感度補正では、十分に観測天体からの情報を見ることができていない可能性もある。

Ⅸ. 参考文献

- 彗星とその観測　広瀬秀雄・関　勉　著
- 太陽系　小尾信彌・古在由秀・守山史生　著
- 新・宇宙を解く　横尾武夫　編
- 地学入門［地球と宇宙］　山賀　進　著
- 天文の事典　磯部秀三　編
- 星間物理学　小暮智一　著
- Furusho,R., et al.　2003 , PASJ , 1153 , 1156
- Fink,U. , & Hicks , M.D. 1996 , Apj , 459 , 729
- 彗星観測ハンドブック（Astro-HS）
  http://chiron.mtk.nao.ac.jp/~COMET/comet_handbook_2004/
- 小型低分散分光器（GCS）
  http://www.astron.pref.gunma.jp/instruments/gcs.html
- Comet Ovservation Home Page(NASA)
  http://encke.jpl.nasa.gov/index.html
- Recent News and Observations (NASA)
  http://encke.jpl.nasa.gov/RecentObs.html
-

X．謝辞

SGS で卒論を書きたいというわがままを聞きいれてくださり、分光のことをまるで知らない私を、時にはあたたかく時には厳しく見守りながら、最後までご指導くださった定金先生、そして本当に多くの場面で助けてくださった大西高司先輩に心から感謝いたします。

今回のマックホルツ彗星の観測にあたり、観測設備などを使わせてくださった「かわべ天文公園」の皆様に心から感謝するとともにお礼を申し上げます。ありがとうございました。

また、彗星のスペクトルについて相談に乗っていただいたぐんま天文台の河北秀世氏に、この場を借りてお礼を申し上げます。

そして、忙しい中、挿絵を書いてくださった和歌山大の西濱玲子さん、美しい写真を提供してくださった西はりま天文台の太井義真氏にも感謝いたします。

最後に、いつもさまざまな場面で私を支えてくださった宇宙科学研究室と天文学研究室の皆さん、本当にどうもありがとうございました。